

НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ НИЗКОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ГТУ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Марчуков Е.Ю., Федоров С.А.

ОАО «А. Люлька-Сатурн», г. Москва

Развитие мировой энергетики и транспорта привело к резкому росту потребления углеводородного топлива и ухудшению экологического состояния окружающей среды. В связи с уменьшением запасов органического топлива и ухудшением экологии, необходимо разработать и внедрить новые топливосберегающие и экологически чистые технологии сжигания углеводородного топлива. Важная роль в решении этих проблем отводится газотурбинной технике. В связи с этим разработка и внедрение газотурбинных установок (ГТУ) с высокими КПД и низкими выбросами оксидов азота NO_x - наиболее токсичных компонентов продуктов сгорания - относится к приоритетным задачам.

Создание стационарных ГТУ на базе авиационных газотурбинных двигателей является прогрессивным направлением в разработке ГТУ нового поколения. Огромный опыт и последние достижения авиационного двигателестроения позволили разработать отечественные газотурбинные установки (например, ГТУ АЛ-31СТ ОАО «А.Люлька-Сатурн», НК-38СТ АО «СНТК им. Н. Д. Кузнецова», ГТУ-12П АО «Авиадвигатель» и др.) на базе авиационных двигателей, соответствующие мировому уровню [1]. Такие компактные и экономичные ГТУ начинают все шире применяться в энергетике для выработки электрической и тепловой энергии и в газовой промышленности для транспортировки природного газа.

Ухудшение экологии окружающей среды и ужесточение норм на вредные выбросы оксидов азота NO_x и углерода CO современных ГТУ требуют разработки экологически «чистых» камер сгорания.

В ГТУ наибольшее распространение получили камеры сгорания традиционной схемы, в которых топливо и воздух подводятся раздельно, и горение происходит при составах смеси, близких к стехиометрии, где образуются большие концентрации оксидов азота NO_x . При высоких

термодинамических параметрах современных ГТУ (давление воздуха перед камерой $P_2^* \geq 1,5$ МПа и температура газа перед турбиной $T_3^* \geq 1500$ К) возможности значительного уменьшения выбросов NO_x в камерах сгорания традиционной схемы оказались исчерпаны [2,3].

Следовательно, для радикального снижения оксидов азота NO_x в продуктах сгорания и разработки низкоэмиссионных камер сгорания современных ГТУ необходимо внедрить новые принципы организации рабочего процесса, основанные на стадийном (многозонном) сжигании предварительно подготовленных «бедных» топливо-воздушных смесей [4,5].

Разработка низкоэмиссионной камеры сгорания представляет собой сложную научно-техническую задачу и требует глубоких исследований закономерностей образования вредных веществ в их взаимосвязи с бедным горением и поиска компромиссных конструкторских решений, удовлетворяющих ряду сложных и противоречивых требований (экология, устойчивость горения, запуск и др.), предъявляемых к камере сгорания.

Рассмотрим основные проблемы, создающие наибольшие трудности при разработке низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ.

Первая проблема состоит в получении необходимых экологических характеристик по вредным выбросам оксидов азота NO_x и углерода CO . Главные факторы, влияющие на концентрацию оксидов азота NO_x , температура в зоне реакции T_z^* и время пребывания смеси в области высоких температур. Оксиды азота NO_x ($NO + NO_2$), основную часть которых составляет окись азота NO , образуются при окислении азота воздуха в области повышенных температур $T_z^* > 1750$ К. Для исключения локальных зон повышенных температур необходимо создание однородной (однородной) смеси. Это достигается предварительным смешением топлива с воздухом и сжиганием бедной топливо-воздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения $\alpha = 2,0-2,3$. Изменение концентрации оксидов азота NO_x и углерода CO по мощности установки (температуре в зоне горения) имеет противоположный характер. При увеличении температуры горения T_z^* концентрация NO_x резко растет, а концентрация CO падает. Сокращение времени пребывания топливо-воздушной смеси в области повышенных температур приводит к уменьшению концентрации оксида азота NO_x и увеличению концентрации

оксида углерода CO . Низкие концентрации оксидов азота NO_x и углерода CO можно получить в очень узком диапазоне температуры горения $T_2^* = 1600-1750$ К. Уменьшение температуры горения T_2^* ниже 1600 К может привести к высоким концентрациям CO и ухудшению устойчивости горения.

Вторая проблема связана с устойчивостью горения. Трудность решения этой задачи заключается в противоположном характере конструкторских мероприятий по экологии и устойчивости горения. Бедные горючие смеси, обеспечивающие высокие экологические показатели, имеют очень узкий диапазон устойчивого горения. Поэтому для устойчивого горения бедной смеси в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТУ на запуске и переходных режимах при низких давлениях и температурах воздуха (P_2^* и T_2^*) необходим диффузионный факел, а на рабочих режимах при высоких параметрах P_2^* и T_2^* требуется дежурная (пилотная) зона горения (или горелка), поддерживающая горение бедной предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси основной зоны горения.

Устойчивость горения тесно связана с другой проблемой: условие обеспечения горения без проскока пламени в смесительных устройствах низкоэмиссионной камеры сгорания. Для горения без проскока пламени необходимо иметь:

высокую скорость потока ($w > 100$ м/с),

низкую температуру стенок и элементов смесительных устройств,

аэродинамическую структуру потока без следов и обратных токов,

состав смеси, неблагоприятный для проскока пламени.

Наиболее сложной проблемой, с которой столкнулись при создании низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ, является вибрационное горение бедных топливовоздушных смесей. Большое число факторов, влияющих на вибрационное горение, и поиск мероприятий для конкретной камеры сгорания приводят к тому, что каждый разработчик ищет свой путь решения этой сложной задачи. Для горения без высоких пульсаций давления воздуха ($P' \leq 50 \text{ г/см}^2$) в камере сгорания необходимо выполнить следующие условия:

обеспечить оптимальные скорости и составы смесей по зонам горения,

- повысить роль диффузионного горения в дежурной (пилотной) зоне,

поддерживать оптимальные составы смесей по зонам горения на переходных (нестационарных) режимах работы ГТУ,

обеспечить ГТУ современными системами автоматического управления (САУ) и диагностики виброгорения.

Проскок пламени и вибрационное горение могут привести к нарушению работы камеры сгорания и оказать отрицательное влияние на работоспособность ГТУ.

Кроме рассмотренных проблем, вызывающих наибольшие трудности при разработке низкоэмиссионных камер сгорания, остаются и традиционные, связанные с полнотой сгорания топлива, потерями полного давления, запуском ГТУ, полями температур, системой автоматического управления и др.

Анализ конструктивных схем экологически чистых камер сгорания современных зарубежных и отечественных ГТУ показал, что наибольшее распространение получили двухзонные «выносные» индивидуальные и трубчато-кольцевые камеры сгорания, имеющие большие габариты, в особенности, длину. Например, камера сгорания DLE RB-211 фирмы Роллс-Ройс, где для достижения низких выбросов NO_x и CO применяется схема с последовательным расположением зон горения [6].

В рамках программы по конверсии в ОАО «А.Люлька–Сатурн» на базе авиационного газотурбинного двигателя четвертого поколения АЛ-31Ф создана высокоэффективная газотурбинная установка АЛ-31СТ мощностью 16 МВт для газоперекачивающих компрессорных станций. При разработке низкоэмиссионной камеры сгорания ГТУ АЛ-31СТ были поставлены цели:

достижение наилучших показателей ГТУ по экологии, КПД, эксплуатационной надежности и стоимости,

сохранение конструктивно-компоновочной схемы двигателя.

Для камеры сгорания последнее условие можно сформулировать как сохранение типа и размеров камеры сгорания (кольцевая, малогабарит-

ная). Это требует повышения интенсификации процессов подготовки и горения бедной смеси.

Анализ передовых достижений в создании экологически чистых камер сгорания ГТУ и большой научно-практический опыт ОАО «А. Люлька-Сатурн» позволили разработать низкоэмиссионную камеру сгорания ГТУ АЛ-31СТ, наилучшим образом удовлетворяющую поставленной цели. Эта камера сгорания кольцевая многомодульная с предварительным смешением и двухзонным горением бедной смеси. Схема низкоэмиссионной камеры сгорания представлена на рис. 1. Камера сгорания (КС Z-56) состоит из корпуса (1), жаровой трубы (2) и газовых коллекторов (3), (4) для подачи газа к центральным горелкам и газового коллектора (5) для подачи газа к периферийным горелкам. Жаровая труба – кольцевая, малой длины с короткими точечными секциями, имеющими

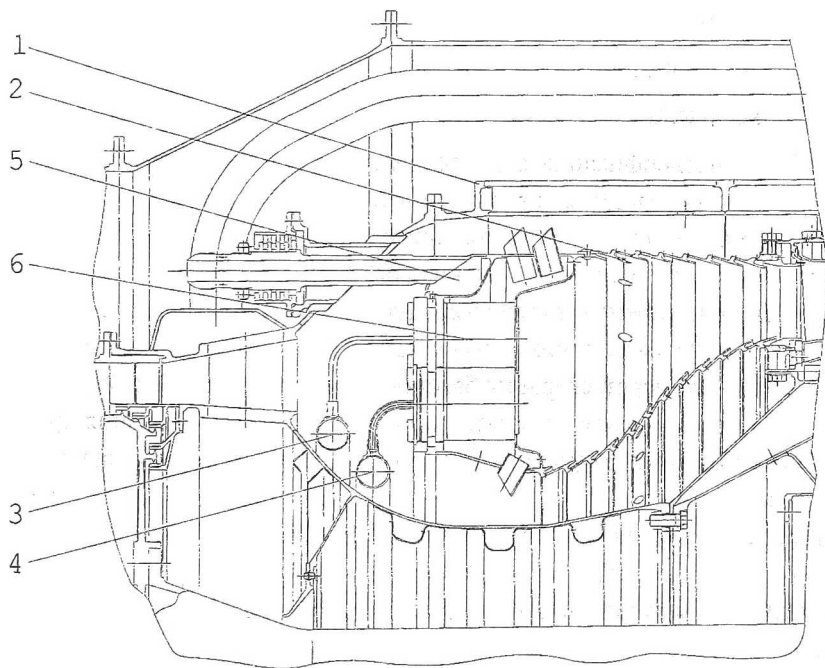


Рис. 1. Низкоэмиссионная многомодульная камера сгорания Z-56.

конвективно-пленочное охлаждение. Фронтное устройство камеры сгорания имеет 56 модулей (6), расположенных в два яруса. Модули представляют собой устройства для смешения газа с воздухом и состоят из

центральной и периферийной горелок, которые образуют первую и вторую зоны горения. Конструктивно образование двух зон горения достигнуто независимой стадийной подачей топливного газа к центральной и периферийной горелкам модулей камеры сгорания. Первая зона работает на запуске и переходных режимах ГТУ, вторая совместно с первой – на основных режимах работы ГТУ. Управление ГТУ производится двумя регуляторами расхода топливного газа, поддерживающими оптимальные составы смеси в первой и во второй зонах горения камеры сгорания. Для достижения низких концентраций NO_x и CO в зоне горения поддерживалось устойчивое горение бедной смеси с $\alpha = 2,0-2,3$.

Низкоэмиссионная камера сгорания на номинальном режиме ($N_{уст} = 16$ МВт) работы ГТУ АЛ-31СТ имеет следующие значения параметров:

давление воздуха на входе в камеру сгорания $P_2^* = 1,75$ МПа,

температура воздуха на входе в камеру сгорания $T_2^* = 707$ К,

коэффициент избытка воздуха в камере сгорания $\alpha = 2,8$.

Для интенсификации подготовки смеси процесс смешения топлива с воздухом производится в закрученных потоках. Увеличение числа мест подачи топливного газа и оптимальные скорости приводят к повышению эффективности смешения. Значительная интенсификация процессов подготовки и горения топливо-воздушной смеси позволила сократить длину зоны горения в низкоэмиссионной камере сгорания на 40 % по сравнению с камерой сгорания базового авиационного ГТД.

Априорно, исходя из опыта работ над камерами сгорания традиционной схемы, можно предположить, что в камере сгорания малой длины могут возникнуть большие трудности в получении низкой концентрации окиси углерода и малой неравномерности поля температур газа за камерой сгорания. Для ответа на этот вопрос рассмотрим основные показатели и характеристики низкоэмиссионной камеры сгорания ГТУ АЛ-31СТ.

Экологическая характеристика в виде зависимости концентрации оксида азота NO_x от мощности ГТУ представлена на рис. 2. Испытания по экологии, проведенные в широком диапазоне температур окружающего воздуха t_0 от -25 до 30°C , показали низкие выбросы оксида азота NO_x . На режиме номинальной мощности $N_{уст} = 16$ МВт концентрация

оксидов азота NO_x составила 40 ppm (при 15% O_2). При этом концентрация окиси углерода CO , приведенная на рис.3, находится в диапазоне 30-40 ppm. Путем изменения распределения топлива по зонам горения ($\bar{G}_2 < \bar{G}_1$) можно добиться получения концентрации оксидов азота $NO_x < 30$ ppm.

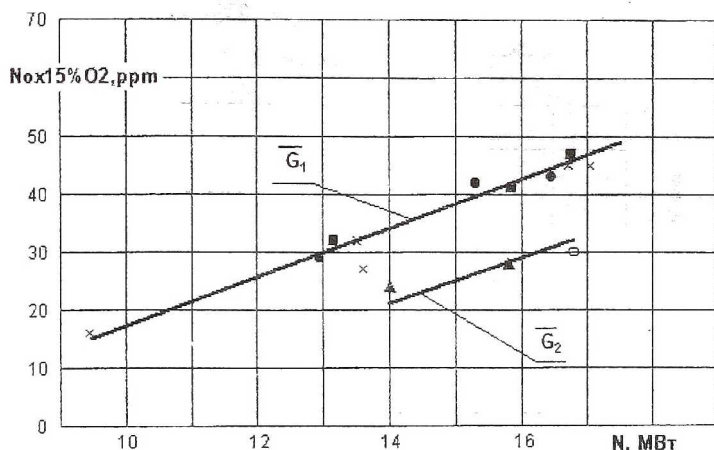


Рис.2. Зависимость выбросов оксида азота NO_x от мощности установки $N_{уст}$

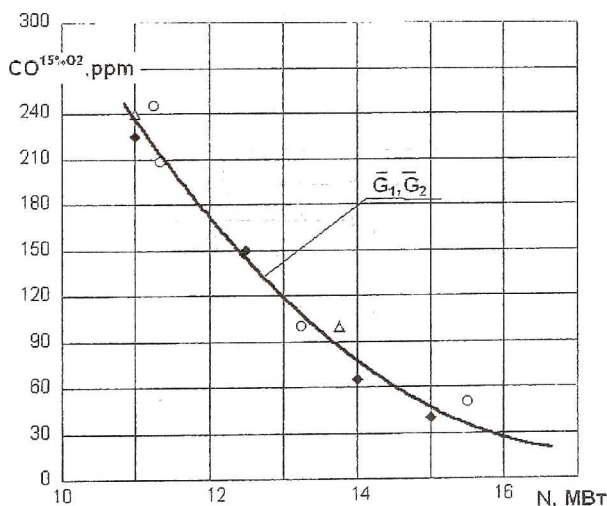


Рис.3. Зависимость выбросов окиси углерода CO от мощности установки $N_{уст}$

Измерения поля температур за камерой сгорания Z-56 выполнены на автономном полноразмерном стенде на режиме: $P_2^* = 0,4$ МПа, $T_2^* = 710\text{K}$, $\alpha = 2,8$. Результаты испытаний в виде радиальной - $\theta_{\text{ср}}$ и окружной - θ_{max} неравномерности показаны рис.4 и 5. Из графиков видно, что радиальная и окружная неравномерности удовлетворяют нормам ТУ. Причем, окружная неравномерность в 2 раза ниже нормы ТУ. Это создает условия для обеспечения надежной работы турбины или форсирования ГТУ по температуре газа.

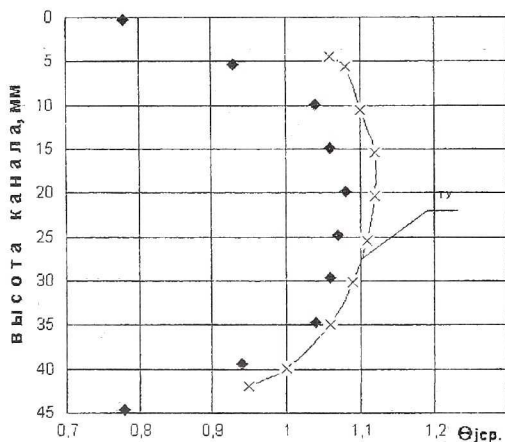


Рис.4. Радиальная неравномерность температуры газа за камерой сгорания Z-56

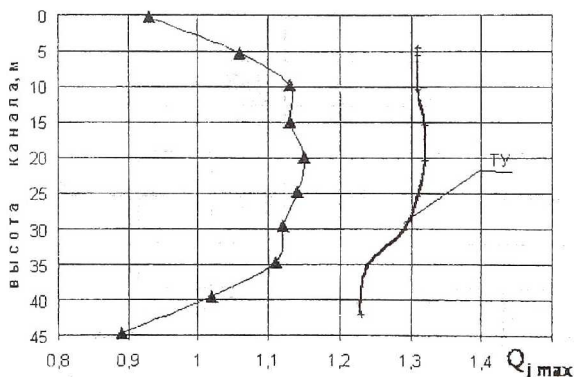


Рис.5. Окружная неравномерность температуры газа за камерой сгорания Z-56

Практические данные по экологии и полям температур, полученные на низкоэмиссионной камере сгорания ГТУ АЛ-31СТ, показывают, что на камере сгорания авиационного типа малой длины при эффективной организации смешения и сжигания бедной топливовоздушной смеси можно получить низкие концентрации оксидов азота $NO_x < 30$ ppm и окиси углерода $CO < 30$ ppm и малую неравномерность поля температур газа за камерой сгорания $\theta_{j, max} < 1,15$.

Для низкоэмиссионной камеры сгорания, основанной на технологии сжигания бедной гомогенной смеси, устойчивость горения является важнейшей характеристикой. Конструктивные мероприятия по центральной горелке низкоэмиссионной камеры сгорания Z-56 позволили улучшить устойчивость горения и получить бедный срыв на режиме малого газа ($P_2^* = 0,32$ МПа, $T_2^* = 430$ К), как у камеры сгорания базового двигателя Z-28 (См. рис 6). При этом экологические показатели КС Z-56 по NO_x и CO не ухудшились.

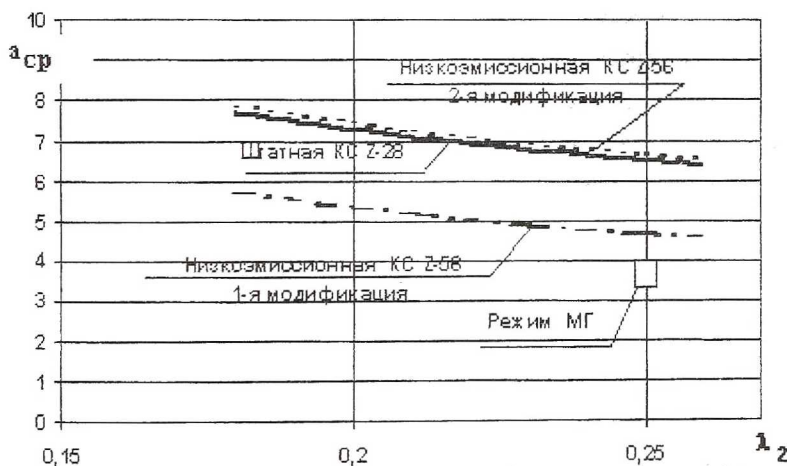


Рис.6. Зависимость коэффициента избытка воздуха при бедном срыве α от относительной скорости воздуха на входе в камеру сгорания λ_2

Многочисленные испытания ГТУ АЛ-31СТ с низкоэмиссионной камерой сгорания показали, что она надежно запускается и на всех режимах работает устойчиво, без проскока пламени и вибрационного горения.

В заключение можно сказать, что низкоэмиссионная камера сгорания ГТУ АЛ-31СТ, разработанная на основе новой концепции, состоящей в интенсификации процессов подготовки и горения бедной смеси с применением авиационных технологий, позволила достичь низких выбросов оксидов азота и наилучших показателей совершенства ГТУ. Эта камера сгорания является конкурентоспособной и имеет ряд преимуществ по сравнению с камерами сгорания "выносного" типа:

- сохраняется конструктивно-компоновочная схема двигателя,
- запуск более простой и надежный,
- снижается неравномерность температуры газа за камерой сгорания,
- уменьшаются потери полного давления,
- сокращается длина зоны горения и уменьшается время пребывания в зоне повышенных температур,
- уменьшается расход охлаждающего воздуха жаровой трубы,
- уменьшается металлоемкость,
- повышается эксплуатационная надежность.

Указанные преимущества создают дополнительные возможности для достижения сверхнизких выбросов оксидов азота $NO_x < 15$ ppm и увеличение надежности и ресурса ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный научно-технический симпозиум "Двигатели и экология" Тезисы докладов, Москва 17-18 июня 1998г.
2. Марчуков Е.Ю. Конверсия высокотемпературного двигателя. -М.: РИА, 1998г, 144с.
3. Маркушин А.Н., Постников А.М., Савченко В.П. Опыт отработки камер сгорания традиционных схем для высокоэффективных ГТУ.// Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998. – С.257-263.
4. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД, -М.: Мир, 1986 г., 566 с.
5. Тухбатулин Ф.Г., Кашапов Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. М.: Недра, 1997 г., 155 с.
6. Ken Fulton. Dry low emissions design based on series us parallel fuel staging. Gas Turbine World. January-February 1996.